

长江中游湖泊 CDOM 光学特性及其空间分布对比*

陈晓玲^{1,2}, 陈莉琼¹, 于之锋¹, 田礼乔¹, 张伟¹

(1: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

(2: 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 根据 2007 年秋季洪湖、东湖和梁子湖的调查结果, 分析了长江中游 3 个典型湖泊 CDOM 光学特性及其空间分布差异。结果表明: (1)CDOM 吸收系数在洪湖最高, 梁子湖最低; (2)在洪湖, CDOM 吸收系数受陆源影响较大, 与悬浮泥沙浓度呈现较好正相关关系, 而在梁子湖, CDOM 吸收系数主要受到浮游植物降解贡献, 与叶绿素浓度具有显著的正相关关系; (3)洪湖与东湖指数函数斜率 S 值变化不大; 梁子湖 CDOM 吸收系数空间分布差异较大, 指数函数斜率 S 值与 400nm 波段 CDOM 吸收系数 $a_g(400)$ 显著负相关。在建立梁子湖 CDOM 遥感反演模型时, 应引入上述指数函数斜率 S 值与 400nm 波段 CDOM 吸收系数之间的线性函数, 对 CDOM 吸收系数的指数模型进行优化。

关键词: 有色可溶性有机物质; 洪湖; 东湖; 梁子湖; 长江流域

Chromophoric dissolved organic matter optical characteristics and spatial distribution in the lakes of the middle reaches of the Yangtze River

CHEN Xiaoling^{1,2}, CHEN Liqiong¹, YU Zhifeng¹, TIAN Liqiao¹ & ZHANG Wei¹

(1: *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, P.R.China*)

Abstract: Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is the colored fraction of the dissolved organic carbon (DOC) pool. According to investigations and filed measurements in Lake Honghu, Lake Donghu, Lake Liangzi in September and October of 2007, optical characteristics and spatial distribution of CDOM in these lakes are analyzed. Results show that CDOM absorption coefficient in Lake Honghu is the highest, with the mean value of the CDOM absorption coefficient at 400nm ($a_g(400)$) is 1.45m^{-1} , while the lowest is in Lake Liangzi, with the mean value of the CDOM absorption coefficient at 400nm is 0.68m^{-1} . A significantly positive correlation between CDOM absorption coefficient and suspended sediment concentration is found in Lake Honghu. In Lake Liangzi, CDOM absorption coefficient is positive correlated with chlorophyll concentration, which means CDOM in the lake is mainly contributed by Phytoplankton degradation. The slope (S) in the exponential correlation function does not vary much in Lake Honghu and Lake Donghu. Fulvic acid is the dominated constituent of CDOM in Lake Liangzi, and the absorption coefficient of CDOM vary extremely. There is a negative correlation relationship (-0.9) between S and $a_g(400)$ in Lake Liangzi.

Keywords: Chromophoric dissolvable organic matter; Lake Honghu; Lake Donghu; Lake Liangzi; Yangtze Basin

有色可溶性有机物质(Chromophoric Dissolvable Organic Matter, CDOM)又称黄色物质, 广泛存在于各种自然水体中, 是溶解性有机物的重要组成部分^[1-3]。CDOM 在紫外波段的强吸收限制了 UV-B 辐射在水中的穿透, 对水体生态系统有明显影响, 另一方面, CDOM 在蓝光波段与浮游植物叶绿素 a 的吸收重叠,

* 国家 863 项目(2007AA12Z161)、国家自然科学基金项目(40676094)、国家科技支撑计划课题(2007BAC23B05)和科技部中德国际合作项目(2006DFB91920)联合资助。2008-10-30 收稿; 2008-12-03 收修改稿。陈晓玲, 女, 1964 年生, 博士, 教授; E-mail: cecxl@yahoo.com.cn.

干扰了叶绿素 a 的遥感信息定量提取^[2]. 鉴于 CDOM 在紫外到可见光波段吸收特性对于水体生物光学不可忽视的作用, 国内外学者对不同地区的 CDOM 光学特性及分布规律进行了诸多研究. Schwarz^[4]利用 SeaBASS 数据集对海洋 CDOM 光学模型进行了对比分析, 探讨了不同海域 CDOM 的分布规律与指数模型参数选取; 张运林等^[5]对太湖尤其是梅梁湾地区 CDOM 光学行为及空间分布进行了研究, 获取了较全面的太湖 CDOM 信息; 也有学者就多个湖泊 CDOM 对水体 UV-B 辐射的影响进行了分析^[6-7].

长江中游地区湖泊众多, 且多为营养盐丰富的浅水湖泊, 受人类活动的影响较为显著, 面临着较大的水环境压力. 本研究选取长江中游地区 3 个不同类型的浅水湖泊: 洪湖、东湖和梁子湖, 研究其 CDOM 的光学特性和空间分布, 分析同一流域不同湖泊 CDOM 光学特性之间的异同和 CDOM 与其他水色要素间的相互关联, 探索人类活动对于湖泊生物光学特性的影响, 以期实现对 CDOM 的光学性质的理解, 为发展内陆水体水色遥感生物光学算法、丰富水环境遥感监测理论提供依据.

1 实验与方法

1.1 研究区域概况

洪湖、东湖、梁子湖分别位于湖北省洪湖市、武汉市和鄂州市, 属亚热带温湿季风气候, 均为浅水淡水湖泊. 洪湖是长江和汉水支流东荆河之间的大型浅水洼地雍塞湖, 是湖北省最大的淡水湖, 中国第七大淡水湖, 平均水深不足 2m, 独特的地理特征使洪湖被称为“天然鱼池”. 20 世纪 80 年代, 洪湖大力发展养殖业, 使水环境受到了极大的破坏. 2004 年洪湖市对洪湖实施抢救性保护, 建立洪湖湿地自然保护区, 近年来水质已明显好转. 东湖位于武汉市东北部, 是世界上最大的城中湖, 旅游业、水产养殖业、水上运动、城市调蓄等诸多产业依托东湖而存在, 使之成为受人类活动影响最为显著的一个湖泊. 梁子湖跨武汉市江夏区与鄂州市梁子湖区, 为河谷沉溺型湖泊, 是湖北省第二大淡水湖. 梁子湖因盛产“武昌鱼”而驰名, 以灌溉、渔业、饮水功能为主, 梁子湖与其它湖泊相比, 受人类活动干预较小^[8-10]. 总的来说, 近 20 年间, 洪湖、东湖、梁子湖分别在不同程度上出现了营养化现象, 基本情况见表 1.

表 1 2007 年洪湖、东湖、梁子湖主要水文资料

Tab.1 Main natural conditions of Lake Honghu, Lake Donghu and Lake Liangzi in 2007

	洪湖	东湖	梁子湖
地理位置	113°17'E, 29°49'N	114°23'E, 30°33'N	114°36'E, 30°12'N
面积(km ²)	438	32.41	158
平均水深(m)	1.34	2.18	2.5
营养化程度	中营养	中度富营养	中营养
水质级别	V 类	V 类	II 类
观测时间	2007-10-01 至 2007-10-02	2007-09-27	2007-10-03
站位数	16	9	10

1.2 数据获取

2007 年 9 月 27 日至 2007 年 10 月 3 日期间, 在武汉东湖、洪湖、梁子湖共布设站点 35 个, 进行水样采集与光学特性观测, 采样站位分布见图 1. 采样时间为观测当日 9:00-16:30, 用标准取水器采集表层水样, 保存在棕色瓶中, 放入冷藏箱带回实验室进行分析.

叶绿素 a 含量采用萃取法测定, 即将表层水样经孔径为 0.45 μ m 的醋酸纤维滤膜过滤, 然后用乙醇萃取. 悬浮泥沙含量的测定采用电子天平称重法, 即用烘干后孔径为 0.7 μ m 的 Whatman GF/C 滤纸过滤, 烘干、冷却后称重. CDOM 吸收光谱测定采用 Ocean Optics HR2000 光谱仪、PX-2 光源和 LWCC 波导池组成的 CDOM 吸收光谱处理设备, 将表层水样经 0.22 μ m 微孔滤膜过滤后注入设备测定吸收光谱, 然后, 经过计算得出 400nm 处的 CDOM 吸收系数和指数函数斜率 s .

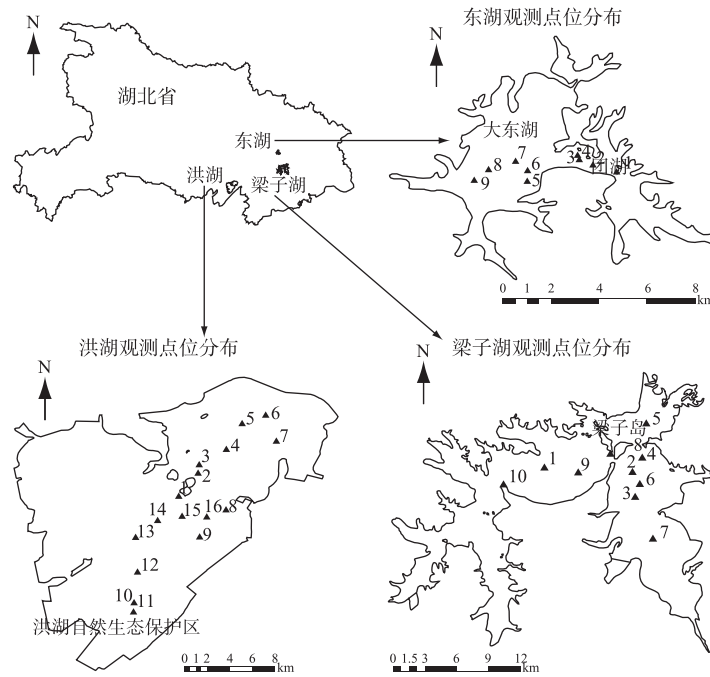


图1 采样站位分布(▲观测点)

Fig.1 Location of sampling station

1.3 参数 $a_g(400)$ 与 S 值的计算

黄色物质吸收特性在紫外波段最强, 到近红外波段趋近于零. 在 UV-B—可见光波段(280–740nm), CDOM 吸收系数与波长近似呈指数关系^[4,11]:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0)e^{-S(\lambda-\lambda_0)} + k \quad (1)$$

其中, $a_g(\lambda)$ 为 CDOM 吸收系数, $a_g(400)$ 为参考波长 λ_0 为 400nm 处的 CDOM 吸收系数, 文中指数函数斜率 S 的估算波段为 400–700nm, k 值的引入是为了规避所有由非有机物造成的基线抬高或降低.

2 结果与分析

2.1 主要水质参数

表 2 给出了本次调查获取的洪湖、东湖、梁子湖水色三要素参数, Chl 为叶绿素、SSC 为悬浮泥沙. 梁子湖 8 站点的叶绿素参数, 因浓度过低而导致未检出.

观测期间(秋季)3 个湖泊叶绿素浓度变化在 1.09–40.85 $\mu\text{g/L}$ 之间. 洪湖的叶绿素浓度中值(4.44 $\mu\text{g/L}$) 低于东湖(16.8 $\mu\text{g/L}$)与梁子湖(29.6 $\mu\text{g/L}$), 且大部分站点叶绿素浓度低于 5 $\mu\text{g/L}$. 虽然梁子湖叶绿素浓度变化范围较大(2.66–40.86 $\mu\text{g/L}$), 但其中值(29.6 $\mu\text{g/L}$)却在 3 个湖泊中最高(表 2).

分析 3 个湖泊叶绿素浓度的空间分布发现: 洪湖叶绿素浓度低值站点均在洪湖自然生态保护区内; 东梁子湖(梁子岛以东)叶绿素浓度均大于 18 $\mu\text{g/L}$, 而西梁子湖(梁子岛以西)水体叶绿素浓度均小于 5 $\mu\text{g/L}$, 呈现以梁子岛为界东西湖区叶绿素浓度的显著差异; 东湖叶绿素浓度空间上无较大差异, 但本次观测中, 以环湖路为界, 西部的大东湖湖区叶绿素浓度略高于东部的团湖湖区. 根据现场记录, 洪湖与梁子湖叶绿素浓度较低的站点沉水植被生长茂盛, 表现出草型湖区叶绿素浓度较之淤泥底质湖泊叶绿素浓度明显偏低.

表 2 洪湖、东湖、梁子湖主要水质参数

Tab.2 CDOM absorption coefficient at 400nm($a_g(400)$) and spectra slope(S), chlorophyll concentration(Chl) and suspended sediments concentration(SSC) in three lakes

水质参数	洪湖			东湖			梁子湖		
	中值	最小值	最大值	中值	最小值	最大值	中值	最小值	最大值
$a_g(400)$ (m^{-1})	1.45	1.24	1.77	1.31	0.91	1.44	0.68	0.37	1.1
$S(\times 10^{-3} nm^{-1})$	17.12	15.65	18.24	16.55	15.65	17	17.68	12.72	20.8
$Chl(\mu g/L)$	4.44	1.09	24.33	16.8	14.52	29.39	29.6	2.66	40.85
$SSC(mg/L)$	31	15	77	35	10	48.67	25.9	8.67	57

3 个湖泊的悬浮泥沙浓度, 无论从中值或是动态范围而言都较为接近. 洪湖、东湖悬浮泥沙在空间分布上无明显规律, 且与叶绿素的相关关系不显著. 而在梁子湖, 西梁子湖悬浮泥沙浓度明显低于其它湖区, 分析梁子湖悬浮泥沙与叶绿素含量的相关关系发现, 二者线性相关系数达到 0.89. 在东梁子湖, 叶绿素浓度与悬浮泥沙呈现正相关关系, 相关系数为 0.8, 而西梁子湖叶绿素与悬浮泥沙呈负相关关系, 相关系数为-0.92.

2.2 CDOM 光学特性对比分析

2.2.1 CDOM 吸收系数空间分布对比 3 个湖泊的 CDOM 吸收光谱都可以用指数模型(式 1)较好地拟合(图 2). 本次调查的长江中游地区 3 个湖泊 CDOM 在 400nm 处吸收系数($0.37-1.77m^{-1}$)与同季节长江下游地区太湖($0.84-3.2m^{-1}$)研究结果基本吻合, 与国外学者对湖泊 CDOM 调查的结果($0.20-4.72m^{-1}$)也较接近, 明显高于海岸带与海洋中的 CDOM 吸收系数^[4,6-7,12].

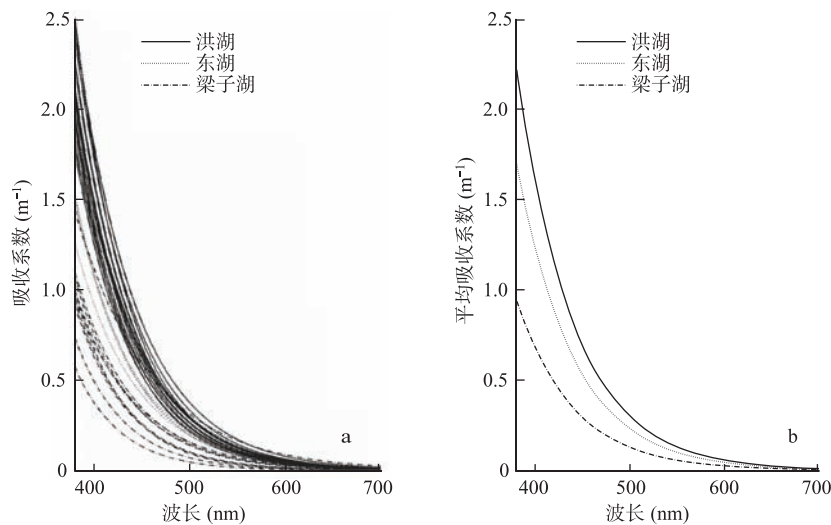


图 2 CDOM 吸收光谱: 洪湖、东湖、梁子湖各站点 CDOM 吸收系数曲线(a); 洪湖、东湖、梁子湖 CDOM 平均吸收系数曲线(b)

Fig.2 Absorption coefficient spectra of CDOM: CDOM absorption coefficient spectra of all stations(a); average absorption coefficient spectra(b)

在 380-700nm 范围内, 3 个湖泊 CDOM 吸收系数曲线可清晰地分为 3 组, 整体呈现洪湖>东湖>梁子湖的趋势, 随着波长的增加逐渐递减并聚集于 700nm 附近. 唯有梁子湖 4 号站点 CDOM 吸收系数曲线与其它站点形成交点, 在小于 440nm 的波段范围内 CDOM 吸收系数低于洪湖所有站点, 但在大于 440nm 的波段范围内 CDOM 吸收系数渐渐高于本次观测其它站点, 主要是由于该站点 S 值远小于本次调查其它站点所致.

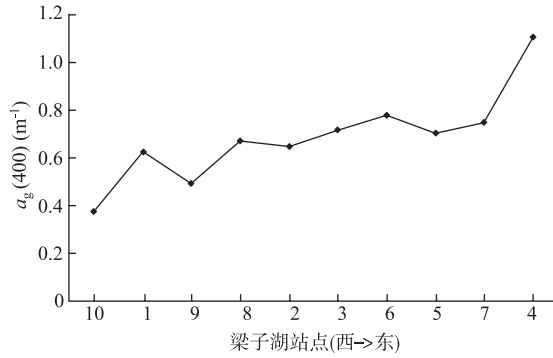
图3 梁子湖各站点 $a_g(400)$ 随经度变化

Fig.3 CDOM absorption coefficient at 400nm varies by longitude in Lake Liangzi

性分析。同时,考虑到洪湖、梁子湖湖区叶绿素浓度的明显差异,将3个湖泊所有站点按水生植被生长状况分为草型湖区和藻型湖区。

有研究表明,藻型湖泊 CDOM 吸收系数明显高于草型湖泊,并认为可能的原因是由于夏季浮游植物大量生长后,腐烂降解物质在秋季对 CDOM 吸收系数的贡献^[13]。但从本次调查的结果来看,草、藻型湖泊叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度与 CDOM 之间的相关关系均不显著。将洪湖划分为草型湖区与藻型湖区后,并未发现藻型湖区 CDOM 吸收系数高于草型湖区的现象,可见,秋季洪湖 CDOM 的主要来源并非是浮游植物的降解。就单个站点数据来看,洪湖 CDOM 吸收系数与悬浮泥沙浓度的高值均出现在湖岸区域,尤其是洪湖北部蓝田工业区附近水域,而从量化的线性相关系数(表3)可看出,洪湖 CDOM 与悬浮泥沙浓度中度相关(显著性水平 <0.05),相关系数达到 0.714,与海岸带与湖泊的同类研究略有不同^[12,14],但 Boss E 在对海岸带水体进行光学特性研究时发现所研究海域内悬浮泥沙吸收系数与 CDOM 吸收系数呈现共同变化趋势,并以此认为沉积物的再悬浮是水体 CDOM 的来源之一^[15]。在本研究中,需要进一步高精度分层采样分析实验,来验证洪湖 CDOM 是否源自湖泊底质的再悬浮。

表3 CDOM 400nm 吸收系数与悬浮泥沙、叶绿素浓度的相关关系
Tab.3 Correlation coefficient of CDOM absorption coefficient at 400nm, suspended sediment and chlorophyll concentration

		相关系数	显著性水平	样点数
洪湖	SSC vs $a_g(400)$	0.714	<0.05	11
	Chl vs $a_g(400)$	0.352	>0.05	16
东湖	SSC vs $a_g(400)$	0.114	>0.05	9
	Chl vs $a_g(400)$	0.465	>0.05	9
梁子湖	SSC vs $a_g(400)$	-0.468	>0.05	8
	Chl vs $a_g(400)$	0.695	<0.05	9
草型湖区	SSC vs $a_g(400)$	0.39	>0.05	7
	Chl vs $a_g(400)$	-0.12	>0.05	12
藻型湖区	SSC vs $a_g(400)$	0.33	>0.05	19
	Chl vs $a_g(400)$	-0.45	>0.05	21
所有湖泊	SSC vs $a_g(400)$	0.38	>0.05	26
	Chl vs $a_g(400)$	-0.21	>0.05	33

剔除梁子湖 4 站点后进行分析发现,梁子湖 $a_g(400)$ 远小于洪湖、东湖,尤其在西梁子湖, $a_g(400)$ 仅为 $0.52 \pm 0.14 m^{-1}$ 。梁子湖 $a_g(400)$ 自西向东有递增趋势。西梁子湖叶绿素、悬浮泥沙、CDOM 含量均低于东梁子湖,水质状况更好(图3),这与张文漫等 2003-2004 年观测的结果一致^[10]。相比之下,洪湖、东湖 $a_g(400)$ 并未出现与梁子湖类似的显著空间分布规律,但从各站点的数据对比来看,总体呈现出,离湖岸较近站点的 $a_g(400)$ 高于离湖岸较远的站点。

2.2.2 CDOM 来源分析 为了研究 CDOM 的来源,本文分别对洪湖、东湖、梁子湖的 CDOM 吸收系数与叶绿素、悬浮泥沙浓度进行了相关性

东湖 CDOM 吸收系数与悬浮泥沙、叶绿素之间均无显著相关关系, 但 CDOM 吸收系数与叶绿素 a 呈正相关, 说明其变化仍有一致的地方. Yang 等 2003–2004 年对东湖 CDOM 吸收系数的测定结果表明秋季东湖的 $a_g(400)$ 明显高于春季^[16], 呈现明显的季节性变化, 说明夏季浮游植物大量生长后, 其腐烂降解的产物导致东湖 CDOM 吸收系数发生变化.

梁子湖的 $a_g(400)$ 与叶绿素浓度呈现中度相关, 相关系数为 0.695, 且藻型湖区的 $a_g(400)$ 明显高于草型湖区, 表明梁子湖中浮游植物的降解对 CDOM 的吸收起着主导作用, 但在 4 号站点, $a_g(400)$ 高达 1.1m^{-1} , 远高于梁子湖其它站点. 通过对梁子湖流域的考察发现, 除农业面源外, 东梁子湖流域苎麻加工和非金属矿加工等工业企业较为密集; 西梁子湖流域污染源以规模化养殖业为主, 东梁子湖流域工业污染的不当排放可能是导致东梁子湖 CDOM 吸收系数高于西梁子湖的原因. 而 4 号站点靠近湖心的梁子岛, 该岛为当地旅游胜地, 大量未经处理的生活污水由梁子岛排入湖, 是 4 号站点 CDOM 吸收系数较整个湖区偏高的主要原因.

2.2.3 指数函数斜率 本次调查中, CDOM 吸收曲线指数函数斜率 S 值大小与长江中下游地区其他湖泊的观测结果接近, 普遍高于一般近岸及海洋水体的研究结果, 与其他学者研究发现的内陆淡水湖泊 S 值比海洋中略高的结论吻合^[7,15-17].

3 个湖泊 $a_g(400)$ 与指数函数斜率 S 的关系(图 4)说明, 梁子湖 S 均值略高于洪湖、东湖, 尤其是西梁子湖区, S 值为 $19.56 \pm 0.09 \mu\text{m}^{-1}$, 远高于东梁子湖区的 $15.93 \pm 0.25 \mu\text{m}^{-1}$. 而东湖 CDOM 指数函数斜率 S 值动态范围最小, 洪湖 S 值大小与动态范围与东湖接近.

同一湖区内 S 值的差异与水体中 CDOM 的成分有关, Carder 在其研究中指出海洋富里酸的比例系数为 0.019, 而腐殖酸的比例系数为 0.011^[18]. Keith 和 Yoder 也指出以富里酸为主要组分的 CDOM, 其 S 值是腐殖酸占主要成分的 CDOM 的 2 倍^[19]. 王林等在此基础上利用腐殖酸与富里酸不同的比例系数, 从理论上分析了导致 $a_g(400)$ 与 S 负相关关系的不确定性原因^[20]. 分析本次调查的 3 个湖泊的 $a_g(400)$ 与 S 的关系可以看出, 梁子湖的 $a_g(400)$ 与 S 之间表现出较好的线性负相关关系, 相关系数达到 -0.9 (显著性水平: $\alpha=0.01$), 线性表达式为 $S=-11.4a_g(400)+25.2$.

东湖与洪湖的 $a_g(400)$ 与 S 并没有显著的负相关关系. 可以初步认为, 梁子湖 $a_g(400)$ 与 S 之间较好负相关关系的原因, 主要是由于梁子湖水体中由浮游植物降解产生的富里酸含量较大, 即使富里酸的比吸收系数较小, 依然导致 S 值偏高.

3 结论

通过对比洪湖、东湖、梁子湖 CDOM 光学特性, 可以看出, 同一流域的不同湖泊, CDOM 光学性质存在差异, CDOM 吸收光谱的影响因素也不尽相同. 对于湖泊 CDOM 光学性质与来源的分析, 需要长期的研究与分析. 但从本次秋季调查来看, 洪湖 CDOM 与悬浮泥沙相关性较高, 浮游植物降解对其贡献甚微; 东湖 CDOM 与叶绿素、悬浮泥沙无明显相关关系, 但受浮游植物降解影响产生季节性变化; 梁子湖浮游植物的降解对 CDOM 吸收系数的变化起主导作用. 因此, 在对洪湖与梁子湖进行生物光学模型构建时, 要充分考虑悬浮泥沙、叶绿素与 CDOM 之间的相互作用. 此外, 在 CDOM 吸收光谱估测时, 应考虑不同成分比例对光谱的影响, 在具体针对梁子湖构建指数模型时, 引入 $a_g(400)$ 与 S 值之间的线性关系 $S=-11.4a_g(400)+25.2$, 有助于提高 CDOM 吸收光谱估计的精度.

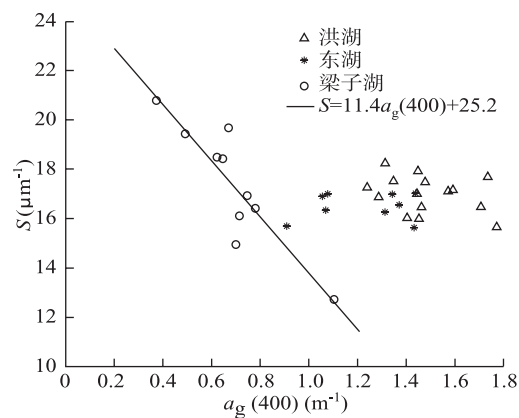


图 4 洪湖、东湖、梁子湖 CDOM 400nm 吸收系数与指数函数斜率 S

Fig.4 CDOM absorption coefficient at 400nm versus spectra slope of Lake Honghu, Lake Donghu and Lake Liangzi

4 参考文献

- [1] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains. *Limnol & Oceanogr*, 1981, **26**: 43-53.
- [2] Hu CM, Lee ZP, Muller-Karger FE *et al.* Ocean color reveals phase shift between Marine Plants and Yellow Substance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**(2): 262-266.
- [3] Rochelle-Newall EJ, Fisher TR. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.
- [4] Schwarz JN, Kowalczyk P, Kaczmarek S *et al.* Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM). *Oceanologia*, 2002, **44**(2): 209-241.
- [5] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption characteristics in relation to fluorescence in Lake Taihu, China, a large shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 43-52.
- [6] Morris DP, Zagarese H, Williamson CE *et al.* The attenuation of Solar Uv radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon. *Limnol & Oceanogr*, 1995, **40**(8): 1381-1391.
- [7] 杨顶田, 陈伟民 曹文熙. 长江下游湖泊水体中有色可溶性物质的生物光学模式. 遥感学报, 2005, **9**(4): 387-393.
- [8] Hong HS, Wu JY, Shang SL *et al.* Absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, South China. *Marine Chemistry*, 2005, **97**(1-2): 78-89.
- [9] 杜 耘, 陈 萍, Sato K 等. 洪湖水环境现状及主导因子分析. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(4): 481-485.
- [10] 张文漫, 汪自斌, 干 华等. 梁子湖水环境质量评价. 环境科学与技术, 2005, **28**: 102-103.
- [11] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [12] Chen Z, Hu C, Conmy RN *et al.* Colored dissolved organic matter in Tampa Bay, Florida. *Marine Chemistry*, 2007, **104**: 98-109.
- [13] 张运林, 秦伯强, 马荣华等. 太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性. 环境科学, 2005, **26**(2): 142-148.
- [14] Yang H, Xie P, Xing YP *et al.* Attenuation of photosynthetically available radiation by chlorophyll, chromophoric dissolved organic matter, and tripton in Lake Donghu, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, **20**(3): 575-581.
- [15] Boss E, Pegau WS, Zaneveld JRV *et al.* Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2001, **106**(C5): 9499-9507.
- [16] Hayakawa K, Sugiyama Y. Spatial and seasonal variations in attenuation of Solar Ultraviolet Radiation in Lake Biwa, Japan. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2008, **90**(2): 121-133.
- [17] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物的空间分布及光学行为. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 319-326.
- [18] Rottgers R, Doerffer R. Measurements of optical absorption by chromophoric dissolved organic matter using a point-source integrating-cavity absorption meter. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2007, **5**: 126-135.
- [19] Carder KL, Steward RG, Harvey GR. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnol & Oceanogr*, 1989, **34**(1): 68-81.
- [20] Keith DJ, Yoder JA, Freeman SA. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode Island: implications for phytoplankton in coastal waters. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**(5): 705-717.
- [21] 王 林, 赵冬至, 傅云娜等. 黄色物质吸收系数 $a_g(440)$ 与斜率 s_g 相关关系. 大连海事大学学报, 2007, **33**: 179-183.